

石油钻井井控先进工艺技术的成本效益分析与优化方式探究

王俊涛 (中国石化华北石油工程有限公司科威特项目部, 河南 郑州 450000)

摘要: 钻井井控技术是石油天然气勘探开发过程中保障作业安全、控制生产成本、提高开发效益的重要技术支持, 其技术先进性会对油气田开发的经济可行性形成直接影响。本文首先分析石油钻井井控先进工艺技术, 阐述其成本构成并探讨先进工艺在降低事故损失、提高钻井效率、优化资源配置等方面的效益, 以期合理选择井控先进工艺、动态平衡成本效益提供参考, 推动石油行业在保障作业安全的基础上提升经济收益。

关键词: 石油钻井; 井控先进工艺; 成本构成; 效益评估; 优化策略

中图分类号: TE28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 006-0082-03

Cost benefit analysis and optimization methods exploration of advanced technology for oil drilling well control

Wang Juntao(Kuwait Project Department of Sinopec North China Petroleum Engineering Co., Ltd., Zhengzhou Henan 450000)

Abstract: Drilling well control technology serves as a critical technical support for ensuring operational safety, controlling production costs, and enhancing development efficiency during oil and gas exploration and development. Its technological advancement directly influences the economic feasibility of oil and gas field development. This paper first analyzes advanced well control technologies in petroleum drilling, elaborates on their cost structures, and explores the benefits of advanced technologies in reducing accident losses, improving drilling efficiency, and optimizing resource allocation. The aim is to provide references for the rational selection of advanced well control technologies and the dynamic balance between costs and benefits, thereby promoting increased economic returns for the petroleum industry while ensuring operational safety.

Keywords: petroleum drilling; advanced well control technology; cost structure; benefit evaluation; optimization strategies

钻井作业事故的发生往往会产生巨额经济损失、环境污染及人员伤亡, 对企业的成本控制和效益提升带来严重影响。随着我国油气田浅层资源开发的枯竭, 开发的重点逐渐向深层、超深层、海洋以及非常规油气藏转变, 这一开发场景具有地层压力复杂、安全密度窗口窄、施工风险高等特点, 使得传统井控技术在压力控制精度、事故预警能力、流程适配性等方面均存在一定不足。在此背景下, 控压钻井、智能井控监测、电动井控系统等先进工艺技术应运而生。然而, 先进的井控工艺技术往往伴随着较高的成本, 因此深入研究石油钻井井控先进工艺技术的成本效益, 并提出相应的成本优化策略, 对于推动石油钻井井控先进工艺技术降本增效具有重要意义。

1 石油钻井井控先进工艺技术

1.1 控压钻井技术

控压钻井技术的原理是借助动态调节环空压力, 使井内流体压力始终保持在地层孔隙压力和破裂压力之间, 使井内压力控制得更加精准, 从根本上预防井涌、井漏等复杂工况问题的出现。控压钻井技术和传

统钻井技术相比而言, 有效解决了固定钻井液密度控制压力的不足, 依托配备的高精度压力监测设备、自动节流控制系统以及钻井液循环优化装置, 可以做到实时采集环空压力、钻井液流量、地层压力等参数, 在系统智能算法下动态调整钻井液密度、排量和井口回压, 实现智能化、精细化地控制压力^[1]。控压钻井技术的优势在于较高的压力控制精度, 其可以将压力波动控制在 $\pm 0.5\text{MPa}$ 范围内并满足深层、高压、易漏失地层的钻井需求。例如, 大庆钻探钻井二公司的西丁 5-斜更 P10 井施工中应用控压钻井技术, 有效解决了传统钻井中钻井液消耗量大、石粉成本高的问题, 将建井周期缩短到 6 天, 具有良好的成本控制效益。

1.2 智能井控监测技术

智能井控监测技术是以物联网、大数据、传感器等新兴技术为技术基底的井控先进工艺, 其将多维度传感器布置在井口、井筒及钻井设备上, 对井下压力、温度、钻井液流量、设备运行状态等参数数据进行实时采集。采集到的数据上传到智能控制平台进行算法分析, 为井控决策的制定提供数据支持, 使井控过程

由被动变主动。该技术的运用效果需要借助高精度传感器网络、数据传输系统、智能分析平台及应急联动装置来实现,其中传感器的监测精度可达到0.1mm级、0.01MPa压力,智能平台在机器学习算法的支持下可实现准确识别异常参数,为井喷、设备故障等风险预警提供依据。智能井控监测技术的设计运用环节可以避免因人工监测不及时导致的事故风险。

1.3 电动井控系统技术

电动井控系统技术是传统液压井控系统的升级版,其技术原理是将电力直驱取代液压驱动,在智能电控模块下直接操控防喷器、节流阀等设备,将复杂的液压管路和液压油储备取消,以实现井控设备的轻量化、智能化与高效化。电动井控系统在响应速度、维护成本和环保性方面均比传统液压系统更具优势。电动井控系统技术在海洋深水等极端环境作业下展现出突出优势,其模块化设计的电动井控系统在3天内即可完成组装,可以有效缩短设备的安装周期,降低平台租赁、人工等成本^[2]。此外,其所内置的多个传感器可以实现全维度监测设备状态,为预防性维护提供数据信号支持,进一步保障钻井作业的连续性和经济性。

1.4 高效防喷防漏一体化技术

高效防喷防漏一体化技术是为复杂地层井控风险而设计的复合式先进工艺,其原理是对井壁稳定措施进行优化,对防喷设备结构进行改进,同时运用新型堵漏材料确保协同控制防喷与防漏问题。该技术的运用依赖于如下几个模块,一是依托双闸板结构与智能密封技术的新型防喷器模块,在紧急情况下其可以在3s内关闭井口。二是,采用可降解高分子材料与无机纤维复合体的自适应堵漏材料模块,其可以实现依据漏失通道的大小自动调整粒径分布,堵漏成功率在95%以上。三是,通过准确计算地层应力,优化钻井液配方与固井工艺的井壁稳定优化模块,其可以在减少井壁坍塌风险的同时延长井筒使用寿命。

2 石油钻井井控先进工艺技术的成本效益

2.1 成本构成

对石油钻井井控先进工艺技术的成本进行拆解,包括以下几个方面。

①技术研发和引进成本。这一成本包括自主研发过程的购置试验设备、数据采集、算法优化等费用,以及引进国外的先进技术专利费、技术转让费等成本。例如,研发智能井控监测系统需要投入大量的资金用于购置传感器、构建数据模型和开发平台,具有较高的研发成本。中小企业的自主研发能力较弱,因此技术引进是其主要选择,这部分成本在前期总成本中的

占比约为30%~40%^[3]。②设备采购和安装成本。先进井控工艺技术对设备精度、智能化水平具有较高的要求,智能防喷器、高精度压力监测仪、电动井控模块等设备的价格昂贵。同时,先进设备的安装调试具有较大的难度,需要配备专业的技术人员和配套设施。此外,为了能够和先进工艺技术有更好的适配性,个别情况下需要对部分钻井设备进行改造升级,这将进一步增加设备相关成本。③施工和运维成本。施工成本的主要构成包括钻井液、堵漏材料等耗材费用,以及设备租赁、现场作业人工费用。先进工艺技术可以减少耗材消耗和作业时间,但是可降解堵漏材料、高精度钻井液处理剂等部分专用耗材的价格较高,这将在一定程度上增加施工耗材成本。为了充分发挥先进井控设备的优势,日常需要对其进行安排专人维护,定期校准、更换部件的费用相对较高^[4]。但是因为设备具有良好的稳定性且故障率低,因此其运维成本在全生命周期内远低于传统设备因故障导致的维修与停工成本。④人员培训成本。科学运用先进井控工艺技术对操作人员的专业技能要求较高,需在技术原理、设备操作、风险识别、应急处置等方面对操作人员实施全面培训。同时,为了保证技术运用效果,部分企业还需额外聘请专业的技术人员,这将导致人力成本投入增加。

2.2 成本效益分析

井控先进工艺技术的效益主要体现在经济效益、安全效益以及社会效益三个方面,其中经济效益是和成本直接挂钩的指标,其与安全效益、社会效益相互促进并形成良性循环。

①经济效益包括直接效益和间接效益两方面,其中直接效益包括以下几点:一是有效降低事故损失,在生产过程中一旦发生井喷、井涌等井控事故,会导致钻井停工、设备损坏、资源泄漏等直接损失,同时还需要在环境治理、赔偿等方面承担一部分费用^[5]。而先进井控工艺技术通过准确的压力控制、实时风险预警,可有效降低井控事故发生率,从而减少事故相关成本。二是缩短钻井周期降低成本,先进工艺技术能够提升钻井效率、减少非生产时间,从而有效缩短建井周期。例如,大庆钻探应用控压钻井技术后,单井建井周期较设计缩短1.5天。三是,借助资源配置的优化措施可有效控制耗材浪费现象。其中,控压钻井技术所采用的钻井液循环利用方案配合高效防漏技术的堵漏成效,既能有效降低钻井液、堵漏材料等各类耗材的用量,还能降低废液排放及后续处理所产生的相关成本。除此之外,该技术还能带来一系列间接经济效益:一是先进井控工艺通过科学优化井内压力

环境减少地层受损情况,进而提高油气井的产量与采收率,延长油气井的运行年限。以页岩气开发为例,控压钻井技术可防止钻井液漏失对储层造成污染,辅助提升单井页岩气产量提升,间接增加油气开发的整体收益。二是先进井控技术的应用可以让企业在复杂区块开发过程中形成技术优势,使其能够获取更多的优质油气资源,在降本增效的同时提升项目盈利水平。三是先进井控设备的优势特点表现为稳定性强、使用寿命长,且全生命周期内可通过智能监测实现预防性维护,可以有效减少后期设备更换与维修投入并实现长期生产运维成本的合理管控

②其安全与社会效益体现在以下几个维度,应用先进井控工艺技术可以为相关人员的作业过程提供安全保障,同时可以避免因为油气泄漏造成的生态污染,从而减少设备层面所形成的负面影响。比如,电动井控系统的运用可以有效防控液压油泄漏隐患,智能井控监测技术能提前预判风险,规避事故引发的环境污染与人员伤亡问题,从而减少环境治理及赔偿支出,间接创造一定的经济效益。

3 石油钻井井控先进工艺技术成本效益优化策略

3.1 提高技术适配性和性价比

要实现技术适配性与性价比的双向提升,需要转变以往的思维逻辑,结合区块钻井的实际需求全方位推进技术方案、研发模式及应用场景的更新改革,从源头实现降本增效。①企业需要将自主创新作为突破点,最大限度减少对国外技术与设备的过度依赖,以此有效控制技术引进及后续维护的各类成本。对于不同油气田区块的井控技术难点问题着力研发出适配性强、成本可控且效率突出的先进工艺。例如,通过优化智能井控监测系统的传感器布设方式和算法模型,有效降低设备生产制造成本。同时开发出低成本可降解堵漏材料并完善相应的技术体系,以促进提升各类技术的协同能力,减少不必要的投入^[6]。②技术应用环节需坚持差异化原则,对技术选择和设备配置进行优化。例如,对于压力稳定、安全风险较低的区块可选用简化型控压钻井技术,该技术可以有效控制设备采购环节的成本。而对于深层高压等复杂区块则优先选用电动井控系统和智能监测技术,保障长期效益可靠。此外,通过推广钻井液循环复用、设备共享租赁等资源高效利用模式,有助于进一步提升资源利用率,全方位放大技术应用的性价比优势。

3.2 加强全过程成本管控

先进井控工艺技术的成本效益提升离不开完善的管理体系作为支撑,需要从成本、人员、设备三大方面构建出全覆盖、全流程的管控机制,实现成本效益

最大化。①设备管理环节,针对井控先进工艺相关设备,搭建包括采购、安装、调试、运维等在内的全生命周期管理体系。在智能监测技术的支持下实现对设备定期保养、检修,以确保设备生产运行的稳定性,避免因设备故障导致的停机损失及更换成本,间接优化成本效益。②人员管理环节,运用多元化培训考核体系打造出专业化的技术人才梯队,以促进提升操作人员和技术人员的专业素养和实操能力,规避因为操作失误引发的事故风险和额外成本。③成本管控环节,将研发、采购、施工、运维、培训等各环节纳入到全生命周期成本核算机制。通过实时监测成本支出、动态评估技术成本效益,分析不同技术与方案的投入产出比,为技术选型和方案优化提供数据支持,规避盲目投入导致的成本浪费。

4 结束语

综上所述,石油钻井井控先进工艺技术在保障钻井作业安全、提升油气开发成本效益过程中彰显重要作用,其运用成本具有初期投入高、运维成本低、事故成本低的特点。控压钻井、智能井控监测、电动井控系统先进工艺技术的应用有助于降低生产事故发生率、缩短钻井周期、优化资源配置,进而实现成本的有效控制与效益的显著提升,虽然前期的投入较高,但在全生命周期内仍具有良好的成本效益。展望未来,在数字化、智能化技术的发展过程中,井控先进工艺技术也将借鉴新兴技术优势,向着更智能、更高效、更环保的方向发展,其技术成本结构和效益转化效率也将得到进一步优化提升,为石油行业高质量、可持续发展提供技术支持。

参考文献:

- [1] 屈亚东. 高温高压地层井控工艺优化与风险管理实践[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(24): 52-54.
- [2] 向昆明, 雷玉雪. 昭地1井冲洗液工艺技术和井控措施探讨[J]. 四川地质学报, 2022, 42(S1): 83-87.
- [3] 庞鑫. 压裂后起工具段过程中井控技术分析[J]. 化学工程与装备, 2021, (07): 47-48.
- [4] 谭橙. 石油钻井工艺技术措施研究[J]. 化工管理, 2021, (09): 171-172.
- [5] 张勇奇. 井下作业井控工作中的常见问题[J]. 中国高新科技, 2020, (19): 90-91.
- [6] 高嵩. 油田井下作业井控技术措施[J]. 化学工程与装备, 2020, (04): 50+55.

作者简介:

王俊涛(1979-)男,汉族,河南汝州人,本科学历,职称:初级。研究方向:钻井工程或技术。